



Réalisation d'un audit sur les coûts du réacteur EPR2

Synthèse

Roland Berger
Paris, 8 janvier 2020

Préambule

L'audit sur les coûts de construction du réacteur EPR2 a été commandé par la DGEC (Direction Générale de l'Energie et du Climat, Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire) et l'APE (Agence des Participations de l'Etat, Ministère de l'Economie et des Finances). Il s'inscrit dans le programme de travail lancé par le Gouvernement sur le mix électrique post 2035 annoncé dans le projet de PPE 2019-2028.

Visant à apprécier la pertinence et la robustesse des objectifs de coûts proposés par EDF pour le nouveau modèle de réacteur EPR2, l'audit s'articule autour de **5 volets** :

- > La compréhension des choix de conception (volet 1).
- > L'audit du modèle de coût et du planning (volet 2).
- > L'analyse des risques et opportunités (volet 3).
- > La pertinence des cibles de compétitivité (volet 4).
- > L'estimation du coût complet de l'électricité (volet 5).

Cet audit a été confié au cabinet de conseil **Roland Berger**, qui a travaillé de septembre à décembre 2019 à partir de plusieurs sources d'informations et de données, dont :

- > Environ **200 documents** mis à disposition par EDF, ayant trait aux 5 volets de l'audit.
- > Environ **30 ateliers de travail** thématiques avec EDF ou Framatome pour approfondir certains sujets (e.g. surveillance des fournisseurs, achats, maîtrise de l'ingénierie, etc.).
- > Une **dizaine d'entretiens complémentaires** avec l'ASN et des fournisseurs d'EDF pour intégrer des avis externes sur la prise en compte du retour d'expérience des précédents projets par EDF.
- > Des **ateliers de travail avec des Senior Advisors de Roland Berger**, anciens dirigeants au sein de la filière nucléaire.

Il est utile de préciser le périmètre et le contenu des données utilisées lors de la réalisation de cet audit et leur niveau de maturité. **La référence de base a été l'estimation d'EDF de mars 2019 (estimation la plus récente à date) des coûts palier et de construction de la première paire dans le cadre d'un programme de 3 paires de tranches EPR2.**

Sur la compréhension des choix de conception (volet 1) :

- > L'audit de Roland Berger s'est articulé autour de 4 thèmes : la cohérence d'ensemble des choix de conception de l'EPR2, la cohérence vis-à-vis des décisions des autorités de sûreté, l'intégration des retours d'expérience des projets EPR et la gouvernance projet.
- > Concernant l'intégration des retours d'expérience, une analyse systématique des constats des précédents projets, des causes racines associées et des solutions proposées par EDF a été menée (les analyses reposant principalement sur le projet Flamanville 3). Des points de vigilance ont été formulés puis traduits en facteurs clés de succès.

Sur l'estimation d'EDF des coûts palier et de construction de la première paire (volets 2 et 3) :

- > L'estimation d'EDF intègre des provisions pour risques forfaitaires : Roland Berger les a remplacées par sa propre vision des risques, avec une approche probabiliste.
- > L'estimation d'EDF intègre également des provisions pour incertitudes calculées selon les standards internationaux (AACE, *Association for the Advancement of Cost Engineering*) : Roland Berger a conservé l'estimation EDF de ces provisions.
- > Les autres postes de coûts de l'estimation (hors provisions pour risques et incertitudes) n'ont pas été challengés par Roland Berger, qui a uniquement audité la méthodologie des estimations.

Sur la vision du programme de 3 paires de tranches EPR2 (volet 4) :

- > L'estimation d'EDF de mars 2019 se concentre uniquement sur les coûts palier¹ et les coûts *overnight*² de la première paire (coût de construction hors intérêts intercalaires³). Afin d'avoir une vision du programme de 3 paires de tranches, Roland Berger a modélisé les coûts des paires #2 et #3 à partir de sa vision des coûts de la paire #1 (avec des hypothèses de réduction des provisions pour risques, d'adaptation des contraintes sites et d'intégration d'un effet de série).
- > EDF propose en revanche une estimation de l'effet de série sur le planning de construction des tranches. En particulier, EDF envisage un gain de 6 mois entre les deux tranches d'une même paire, ce qui est jugé cohérent par Roland Berger au regard des observations historiques du parc.

Sur l'estimation du coût complet de l'électricité (volet 5) :

- > L'ensemble des travaux permet d'aboutir à l'estimation de 2 notions complémentaires de coût complet de l'électricité : d'une part, le **coût du programme de 3 paires de tranches EPR2** qui comprend les coûts palier (coûts palier mutualisés entre les 3 paires) et les coûts de construction *overnight* des 3 paires (hors intérêts intercalaires); et d'autre part, le **coût standard théorique du produit EPR2** (LCOE, *Levelized Cost of Energy*), qui représente le coût de construction d'une paire de série, post-programme de 3 paires, sans coûts palier ni contraintes sites.
- > Les estimations de ce volet sont basées sur les coûts palier et les coûts de construction *overnight* des 3 paires de tranches EPR2 modélisés par Roland Berger.
- > En revanche, les autres composantes (coût d'opération et maintenance, coût de la fiscalité, coût du combustible et coût du démantèlement) ont été fournies par EDF et ont été utilisées par Roland Berger, après avoir été jugées cohérentes avec les données disponibles dans les études spécialisées (SFEN, IEA, Lazard).

Dans toutes ses estimations (sauf mention contraire), Roland Berger se place dans le cas de base d'un **scénario P50 de couverture du risque** (approche probabiliste signifiant que 50% des risques seraient couverts par les provisions retenues). L'utilisation de ce scénario suppose l'existence de **prérequis importants**, dont :

- > Des travaux de la filière sur la reconstruction et le maintien des compétences, permettant d'assurer la cohérence d'une vision P50 de la couverture de risques.
- > Une commande simultanée d'un programme de 3 paires EPR2 (hypothèse de l'estimation de mars 2019 d'EDF et principe sur lequel repose les consultations en cours des fournisseurs).
- > Une construction cadencée du programme à un rythme permettant l'intégration du retour d'expérience et un effet d'apprentissage entre tranches et paires successives.
- > Une stabilité du référentiel réglementaire pendant la phase de construction des 3 paires, limitant la production d'études d'envergure et des modifications importantes de design.
- > Une reproduction presque à l'identique des 3 paires, n'embarquant que des optimisations ou modifications mineures de design.
- > L'existence de mécanismes contractuels (voire réglementaires) incitatifs pour les fournisseurs en vue d'obtenir des gains pour les paires #2 et #3.

¹ Les coûts palier (ou coûts de développement) correspondent aux coûts de l'ensemble des activités contribuant à la définition d'une référence utilisable pour la construction d'un palier (ou programme) EPR2 (études d'ingénierie, de développement, de conception, qualification de matériels, etc.).

² Ces coûts comprennent les coûts de construction dont les coûts d'ingénierie de la maîtrise d'œuvre ainsi que les frais engagés par le propriétaire du réacteur pour la construction (dépenses liées aux procédures d'autorisation, achat de la première recharge de combustible, etc.).

³ Intérêts payés sur les emprunts pendant la construction.

Synthèse

1. Compréhension des choix de conception

En synthèse, **le concept EPR2 et son design** incorporent des progrès par rapport à l'EPR (e.g. constructibilité avec le retour à une simple enceinte et l'agrandissement de certains bâtiments) tout en bénéficiant de caractéristiques de puissance (comparable au projet Taishan, en fonctionnement) et d'architecture de la chaudière (comparable à Flamanville 3) contribuant à la **sécurisation du projet** car déjà éprouvées sur d'autres projets.

On constate une amélioration globale par rapport aux projets précédents des **modalités de mise en œuvre des exigences de sûreté** (e.g. diversification des sources froides pour les systèmes de sauvegarde, amélioration des performances du système EVU d'évacuation de la chaleur, etc.). Toutefois, **deux sujets réglementaires** de nature à fortement impacter le design demeurent : la reconduction de l'**exclusion de rupture** et les dispositions de **prise en compte de l'avion militaire**. La remise anticipée d'un **rapport préliminaire de sûreté** (RPS) à l'ASN par EDF fin 2020 est une priorité qui vise à instruire ces sujets.

Enfin, un **effort important d'intégration du retour d'expérience des projets EPR** (Flamanville 3, Hinkley Point C) est observé, en matière de maîtrise de l'ingénierie, d'optimisation de la constructibilité, d'amélioration de l'industrialisation, de sélection et de surveillance des fournisseurs et de pilotage de projet. Les **facteurs clés de succès du programme EPR2** sont liés à la maîtrise de **compétences techniques** (e.g. soudage, conduite de chantier, contrôle de la réalisation et des fabrications) et de **gestion de projet** (e.g. pilotage du projet au plus haut niveau par la qualité des réalisations).

2. Audit du modèle de coûts et du planning d'EDF

L'estimation d'EDF à mars 2019 conduit à des **coûts palier de 2,3 Md€₂₀₁₇** et de **construction overnight de la première paire du programme de 13,9 Md€₂₀₁₇**, intégrant des provisions pour risques forfaitaires (10% des coûts palier, 12% des coûts de construction), qu'EDF a l'intention de conforter par une approche probabiliste dans la prochaine version de l'estimation, prévue en 2020.

La méthodologie de l'estimation EDF des coûts de mars 2019 est considérée comme solide au regard de l'avancement du projet. Environ 50% des coûts palier et 30% des coûts de construction de la paire #1 sont déjà basés sur des volumes et des quantités de matériel propres à l'EPR2. Il est à noter sur ce dernier point que les coûts de la chaudière nucléaire (Framatome) et du groupe turbo-alternateur ont fait l'objet de premières estimations en cours de finalisation, ce qui permettra d'élever à 50% la part basée sur des volumes et des quantités EPR2 (d'ici un an). Les autres hypothèses reposant sur des extrapolations du constaté sur l'EPR seront progressivement remplacées par EDF par des estimations *bottom-up* d'ici 2021.

Le niveau de maturité du planning sans marge, et avant intégration des risques, est jugé élevé compte tenu de l'avancement du projet. Il fixe un objectif ambitieux, cohérent avec l'intégration des retours d'expérience et vertueux pour générer de la marge projet. Un planning de niveau 3 (planning construit ex-nihilo sur les séquences de génie civil, de montage et d'essais à partir de quantités et volumes de matériel, de ratios de productivité et d'une organisation du travail et des ressources) et une analyse de risques détaillée (devant permettre un suivi des risques les plus impactants) existent.

Un **effet de programme**, lié à l'amortissement des coûts palier, mutualisés pour l'ensemble des paires, et à un effet de commandes groupées, est attendu sur les coûts de construction et est intégré dans le devis de base de la première paire par EDF. Au-delà de cet effet principal, un **effet de série** lié à l'apprentissage, en lien avec les observations historiques du parc, pourrait être attendu. Celui-ci a été modélisé par Roland Berger (mais pas par EDF dans son offre de mars 2019). La réduction du coût moyen du programme des 3 paires de tranches par rapport à la première paire est estimée à 5%, soit une diminution d'environ 8% des coûts des paires #2 et #3 par rapport à la première (coûts hors provisions pour risques et hors contraintes sites). Enfin, comme précisé dans la description de la méthodologie en préambule, cet effet se traduit également sur les plannings de construction avec un gain de 6 mois entre les tranches d'une même paire pris en compte par EDF et jugé cohérent par Roland Berger.

3. Analyse des risques et opportunités

Le travail de Roland Berger a été d'agrèger les risques et opportunités identifiés dans les volets 1 & 2, de quantifier leur impact (probabilité d'occurrence, impacts coûts et planning) et de les traduire en provisions de manière probabiliste.

La vision Roland Berger probabiliste en P50 conduit *in fine* à **2,7 Md€₂₀₁₇ de coûts palier (coûts de développement) et 14,8 Md€₂₀₁₇ de coûts de construction overnight pour la paire #1**. L'écart de coût et de planning entre Roland Berger et EDF est dû pour une bonne part à l'évaluation plus élevée de Roland Berger du risque portant sur la capacité de la filière à maîtriser les fabrications et l'*expediting*⁴. Cette évaluation plus élevée fait suite à l'appréciation par Roland Berger d'un risque plus important associé à la reconstruction voire au maintien des compétences de la filière. En effet, la vision en P50 est conditionnée à une **mobilisation forte de la filière industrielle**, uniquement permise par la visibilité (à donner au plus tôt) sur le programme.

Par ailleurs, **Roland Berger considère que la prise en compte des risques dans le planning de construction, dans une vision P50, conduit à ajouter une marge d'environ 30% à la durée de construction estimée par EDF** dans sa vision de mars 2019. Enfin, Roland Berger a estimé qu'il existait un risque de décalage du lancement du programme EPR2 par rapport au scénario de référence d'EDF (décalage compris entre 1 et 2 ans après mi-2021), qui pourrait être de nature à renforcer les problématiques de maintien des compétences.

4. Pertinence des cibles de compétitivité

Le coût d'un programme de 3 paires de tranches EPR2 en vision P50 (somme des coûts palier, des coûts de construction *overnight* de 3 paires et des provisions pour démantèlement) est **estimé à environ 45 Md€₂₀₁₈, hors coût du financement**. Ce coût a été modélisé à partir des résultats du volet 3 et d'hypothèses sur les effets de série et de risques attendus pour les paires #2 et #3.

In fine, **le programme de 3 paires de tranches EPR2 aboutit donc à un coût overnight en vision P50 de 4 385 €₂₀₁₈/kW en vision Roland Berger (hors provisions pour démantèlement par convention, qui sont estimées par EDF à 120 €₂₀₁₈/kW).**

⁴ L'*expediting* consiste à garantir la qualité et la livraison en temps voulu des commandes.

Le coût standard d'une paire de tranches du produit EPR2 (paire théorique de série, post-programme de 3 paires) est quant à lui estimé à **3 836 €₂₀₁₈/kW**, comparable à l'ordre de grandeur de l'objectif EDF (3 650 €₂₀₁₇/kW) et compétitif par rapport à un EPR France reconductible (estimé entre 4 810 et 5 346 €₂₀₁₈/kW), qui correspond à un EPR de type Flamanville 3 hors aléas.

Selon les données disponibles publiquement à date concernant les autres modèles de réacteurs, Roland Berger estime que le **coût d'EPR2**, sur la base du coût d'un programme de 3 paires de tranches, **est compétitif vis-à-vis des réacteurs de génération 3**.

5. Estimation du coût de l'électricité

Le calcul du **coût complet de l'électricité produite** a été mené selon **2 modélisations** distinctes, avec un **WACC normatif réel pré-taxes à 8%**. Ce WACC réel pré-taxes correspond au taux historiquement utilisé par la DGEC dans les études des coûts de référence de la production électrique. Des sensibilités ont été effectuées autour de ce 8% en utilisant 5% pour modéliser un contexte d'exposition au risque faible et 9% pour intégrer une plus grande sensibilité des investisseurs au risque.

Le **coût standard théorique du produit EPR2** (LCOE, *Levelized Cost of Energy*) aboutit, pour un WACC réel pré-taxes de [5% ; 8% ; 9%], à une estimation de **[51 ; 71 ; 78] €₂₀₁₈/MWh**.

Le **coût de revient du programme de 3 paires de tranches EPR2** aboutit, pour un WACC réel pré-taxes de [5% ; 8% ; 9%], à une estimation de **[63 ; 97 ; 111] €₂₀₁₈/MWh**.

Outre l'impact du WACC sur les estimations, **ces coûts de revient sont également sensibles** aux hypothèses retenues pour le **nombre de paires du programme** et pour le scénario de **couverture des risques**. Les autres paramètres de sensibilité testés (coefficients de disponibilité et d'utilisation, durée de vie, taux de diminution des provisions pour risques, etc.) sont de second et troisième ordres.

Table des matières

1. Compréhension des choix de conception	8
1.1 Inventaire et cohérence interne des choix de conception.....	8
1.2 Cohérence avec les avis de l'ASN et de l'IRSN	9
1.3 Prise en compte des retours d'expérience des projets EPR.....	9
1.4 Gouvernance des choix de conception	12
2. Audit du modèle de coût et du planning d'EDF	13
2.1 Modèle de coût.....	13
2.2 Planning	15
2.3 Effet de série	15
3. Analyse des risques et opportunités.....	16
4. Pertinence des cibles de compétitivité	17
5. Estimation du coût complet de l'électricité.....	19

1. Compréhension des choix de conception

Le design de l'EPR2 se distingue de celui de l'EPR par plusieurs évolutions, visant notamment à améliorer la constructibilité de l'EPR2. Nous pouvons noter le passage à une simple enceinte de confinement avec liner, la suppression du concept *two-room*, le passage à 3 trains de sauvegarde, la suppression du bâtiment des auxiliaires nucléaires ou encore l'agrandissement d'autres bâtiments (bâtiment réacteur, bâtiment combustible, bâtiments des auxiliaires de sauvegarde).

1.1 Inventaire et cohérence interne des choix de conception

Au-delà de ces grandes évolutions, l'analyse des **choix de conception** par Roland Berger a été réalisée sur **75 choix principaux** structurés en **7 thèmes** : performance, référentiel de sûreté, chaudière, systèmes de l'îlot nucléaire, installation générale de l'îlot nucléaire et génie civil, station de pompage & auxiliaires de site et îlot conventionnel.

Pour chacun de ces choix, une **description de l'évolution** (ou du maintien) proposée sur l'EPR2 en différentiel par rapport à l'EPR et le **rationnel associé** a été précisé. Etant donné qu'il n'existe pas de "vérité unique" en matière de design, un avis portant sur la **robustesse et la cohérence d'ensemble** a été émis.

En synthèse, le design EPR2, fruit d'environ **10 années d'intégration de retour d'expérience**, apparaît **robuste dans son ensemble** et de nombreux progrès sont observés par rapport à l'EPR, contribuant à **sécuriser le projet**. En particulier :

- > **La puissance, comparable à Taishan**, et l'architecture de la **chaudière, similaire à l'EPR Flamanville**, minimisent les risques de *licensing*.
- > Les modalités de **mise en œuvre des exigences de sûreté** ont globalement été améliorées, faisant suite à des demandes de l'ASN.
- > Enfin, la **constructibilité de l'EPR2** a été davantage prise en considération dès la conception. Plusieurs initiatives en matière de génie civil, de recours accru à la préfabrication et à de nouveaux matériaux devraient sensiblement faciliter les opérations de construction et de montage par rapport à l'EPR.

Néanmoins, **deux sujets réglementaires déterminants** (détaillés en 1.2), **de nature à impacter fortement le design et le coût de l'EPR2** (génie civil, taux de ferrailage, etc.), ont été identifiés et sont en cours d'instruction par EDF. Il s'agit de la justification de la reconduction du **principe d'exclusion de rupture (EdR)** et de l'intégration de dispositions supplémentaires à l'EPR pour la prise en compte de la **chute accidentelle d'un avion militaire**.

Par ailleurs, d'autres choix de conception font apparaître des **risques et incertitudes sur les coûts et les délais de l'EPR2, sans remettre en question le design en lui-même** :

- > Un risque *licensing* en lien avec certaines évolutions (e.g. évolution mineure des générateurs de vapeur, toutefois similaires à Hinkley Point C, utilisation des nouvelles méthodes Cathsbj en cours de qualification pour les 4^{èmes} visites décennales du parc 900 MW, etc.).
- > Un risque lié au design figé tardivement pour la salle des machines (car dépendant du fournisseur retenu, à la suite d'une démarche cependant souhaitable d'ouverture à la concurrence de ce lot).
- > Un risque lié à la perception de l'opinion publique du choix de retour à une enceinte unique.

1.2 Cohérence avec les avis de l'ASN et de l'IRSN

Roland Berger a évalué la cohérence des choix de conception avec les recommandations de l'ASN et de l'IRSN, à partir des **derniers avis publiés en 2018 et 2019**, des **réponses apportées par EDF** à ces courriers et d'un **entretien avec l'ASN**. Au total, **40 sujets** ont été identifiés et classés selon 3 groupes.

Tout d'abord, nous distinguons **2 sujets** à l'issue incertaine, de nature à **impacter significativement le design et les coûts EPR2** en cas de décision défavorable à EDF :

- > La **reconduction du principe d'exclusion de rupture (EdR)** pour le **circuit secondaire principal (CSP) intérieur bâtiment réacteur (BR)** pourrait être remise en question par l'ASN ou *a minima* faire l'objet de dispositions complémentaires (e.g. ajout de casematages). Une démonstration de la maîtrise des exigences du référentiel de sûreté est attendue par l'ASN, en lien avec la réussite de la réparation *in situ* des soudures VVP⁵ de Flamanville 3 et des dispositions prises par EDF pour garantir la bonne réalisation du premier coup. La remise en cause de l'EdR pour le circuit primaire principal (CPP) ou le CSP extérieur BR serait en revanche de nature à remettre très largement en cause le design EPR2 voire le projet (faisabilité technique non acquise à ce jour) ; EDF jugeant toutefois cela peu probable.
- > A la suite d'une demande de l'IRSN, des dispositions supplémentaires à l'EPR pourraient être demandées à EDF pour la prise en compte de la **chute accidentelle d'un avion militaire**, allant au-delà des exigences actuelles de la réglementation (calcul approfondi des conséquences accidentologiques induites par cette chute dans une approche déterministe). Les conséquences techniques et économiques de telles exigences resteraient alors à caractériser.

Ensuite, il existe **11 sujets de nature à impacter le volume d'études et/ou modérément le design EPR2**, qui sont en cours d'instruction et font l'objet d'un suivi par EDF, comme la gestion du combustible MOX ou la création d'enceintes géotechniques sous l'îlot nucléaire.

Enfin, Roland Berger a identifié **27 sujets d'incidence mineure ou déjà clos** à la suite d'études d'évolutions de design et/ou d'avis d'ores et déjà positifs des autorités de sûreté.

Afin d'instruire ces sujets, des échanges continus sont en cours entre EDF et les autorités de sûreté, avec **2 jalons déterminants à venir**. D'une part, EDF envisage la remise anticipée (fin 2020, soit 6 mois avant la demande d'autorisation de création afin de démarrer l'instruction de ces sujets au plus tôt) du **rapport préliminaire de sûreté (RPS)**, comportant l'inventaire des risques présentés par l'installation et l'analyse des dispositions prises pour les prévenir. D'autre part, il y aura le **dépôt puis l'obtention du dossier d'autorisation de création (DAC)**, dont le délai d'instruction par l'ASN est réglementairement de 3 ans prolongeable de 2 ans, qui devrait conduire à une obtention entre 2024 et 2026.

1.3 Prise en compte des retours d'expérience des projets EPR

Après avoir analysé la cohérence d'ensemble des choix de conception et vis-à-vis des autorités de sûreté, Roland Berger a audité **l'intégration des retours d'expérience des chantiers EPR**, en couvrant l'ensemble du cycle *Engineering – Procurement – Construction & Commissioning (EPCC)*.

⁵ Vapeur Vive Principale : tuyauteries des circuits secondaires principaux transportant la vapeur sous pression produite dans les générateurs de vapeur vers la turbine.

1.3.1 Maîtrise de l'ingénierie

Face aux problématiques de **maîtrise de l'ingénierie** constatées sur les précédents projets (e.g. difficultés lors des changements de configuration ou pour la prise en compte des évolutions réglementaires), EDF a mis en place plusieurs initiatives.

L'**Ingénierie Système** et la **digitalisation des processus d'ingénierie** via le **Product Lifecycle Management** (PLM) devraient permettre une meilleure gestion des changements de configuration et garantir un meilleur avancement des études au 1^{er} béton nucléaire.

La **création d'Edvance (rapprochement des ingénieries d'EDF et de Framatome)** vise par ailleurs à la maîtrise de l'ingénierie du programme EPR2, avec un positionnement sur l'EPCC de l'îlot nucléaire. Néanmoins, la nature d'Edvance et son statut de *Joint Venture* peuvent **rendre plus complexes les alignements d'intérêt entre l'entité Edvance et le projet**, et conduire à des **difficultés dans la gestion des interfaces** avec les autres parties prenantes impliquées dans l'ingénierie de la chaudière.

Enfin, un **mode projet clair** a été mis en place, avec un rattachement de l'ingénierie à la direction de projet EPR2 par des points focaux pilotant les activités de leur périmètre.

1.3.2 Optimisation de la constructibilité

Les **contraintes de constructibilité**, basées sur le retour d'expérience de Flamanville 3 (co-activité dans des espaces restreints, ouvrages complexes à réaliser, singularités conduisant à des taux de ferrailage élevés), ont été prises en compte par le projet EPR2 dès la conception.

Le **design et le génie civil** ont été simplifiés pour faciliter la construction de l'EPR2 (e.g. géométrie du récupérateur de corium, alignement des voiles). Les démarches **Design to Cost** initiées ont conduit à opter pour la **préfabrication** de certains ouvrages (e.g. bâtiment électrique non classé). L'utilisation de **maquettes 3D/4D et du BIM (Building Information Modeling)** a également participé à l'amélioration de la constructibilité (e.g. intégration des plans de ferrailage dans la modélisation permettant le *déclashage* avec les platines).

1.3.3 Amélioration de l'industrialisation

L'**industrialisation de l'EPR2** a été nettement améliorée par rapport aux EPR (e.g. coordination insuffisante avec les industriels, dérive du temps passé à sourcer les équipements en raison d'exigences trop contraignantes) grâce au **fonctionnement en entreprise étendue**, à la simplification des spécifications techniques et à la standardisation des références (plus proches des standards industriels et participant à la réduction des coûts d'approvisionnement).

Le **fonctionnement en entreprise étendue** permet d'intégrer les fournisseurs dès la conception, notamment avec les démarches de dialogue compétitif de nature à encourager l'innovation (e.g. salle des machines, modularisation du bâtiment électrique non classé). L'**organisation en plateau et l'intégration de fournisseurs au PLM** sont également de nature à fluidifier les processus et prises de décision. Enfin, ce fonctionnement permet aussi de **préparer et de mobiliser le tissu industriel** en amont de la phase de construction.

1.3.4 Sélection des fournisseurs et achats

Le projet EPR2 vise également à **optimiser le coût des achats et des contrats passés avec les fournisseurs**, grâce à l'effet programme (amortissement des coûts de développement des fournisseurs sur plusieurs

commandes identiques et massification des commandes), **ainsi que leur sélection** grâce à la révision du lotissement contractuel.

Par rapport à l'EPR, le **lotissement contractuel de l'EPR2 a été revu afin de revenir à des lots au périmètre plus étroit et davantage centré sur les compétences et le savoir-faire des fournisseurs**. Si ces lots seront plus aisément maîtrisables par les fournisseurs, la maîtrise d'œuvre et la gestion des interfaces, à la main d'EDF, nécessiteront de ce fait une attention particulière.

La **stratégie d'achat a également été revue**, notamment en matière de **critères de sélection des fournisseurs**, avec l'intégration de la notion de "mieux-disance" technique. Néanmoins, les retours des fournisseurs ont montré que le prix restait encore à ce jour le critère primordial d'achat, et que la notion de mieux-disance demeurait encore souvent confuse pour eux.

Les **modalités contractuelles avec les fournisseurs** ont été améliorées afin de **parvenir à des modes de rémunération (actuellement jugés trop forfaitaires) plus adaptés pour les fournisseurs** en termes de partage des risques (jugé trop déséquilibré sur les précédents projets). Par ailleurs, les **dispositions de surveillance de fournisseurs de rang 2 ont été renforcées** (e.g. obligation de retranscription des exigences du contrat à ses sous-traitants) en retour d'expérience des projets précédents.

1.3.5 Pilotage et organisation du projet

Du point de vue du **pilotage et de l'organisation du projet**, l'EPR2 a intégré différents éléments de retour d'expérience des chantiers EPR afin de mieux maîtriser la réalisation du projet.

Contrairement au lancement du chantier de Flamanville 3, une **équipe projet dédiée sur site** sera mise en place **dès le démarrage des chantiers EPR2**, profitant du retour d'expérience organisationnel de Flamanville 3. Cette équipe devra être **gréée dans la durée, indépendante et disposant des pleins pouvoirs sur l'aménagement** (garantissant ainsi un processus de décision rapide).

Le projet et les contrats seront désormais suivis en continu, avec un **pilotage fin des coûts et des délais** (mise en place de l'*Earned Value Management*, i.e. gestion de la valeur acquise). Néanmoins, il est essentiel qu'EDF appréhende mieux la **gestion des écarts et des risques sur EPR2** en mettant davantage la qualité de la réalisation au centre de la gouvernance, des modes de pilotage et des processus de décision (avant la tenue "pure" du planning).

Un **programme de professionnalisation de la conduite de projet**, orienté autour des meilleures pratiques, de nouveaux outils, de renforcement des compétences (*staffing*, formations, parcours de carrière), a par ailleurs été lancé par la Direction Support aux Projets et Transformation Numérique (DSPTN).

1.3.6 Surveillance des fournisseurs

Un des enjeux majeurs sur EPR2 demeure lié à la gestion et la surveillance des fournisseurs, en défaut sur Flamanville 3 et ayant entraîné de nombreux écarts de qualité.

Face à ces écarts, la **Direction Industrielle a été réorganisée** et diverses initiatives lancées : revue des compétences, développement en amont des analyses de risques, revue du processus de qualification (couple procédé / fournisseur), mise à jour des principes de surveillance et des guides d'inspection et appui aux fournisseurs en difficulté.

En termes de facteurs clés de succès, le besoin de **renforcement des compétences de surveillance sur le terrain** est avéré, afin de réaliser des contrôles *in situ* efficaces (sur le chantier, en atelier et en usine), en phase de qualification des équipements et de suivi de la fabrication.

A titre d'exemple, **Framatome prévoit une évolution des techniques, des méthodes et des outils** afin de répondre aux attentes sur le sujet de la maîtrise des fabrications (e.g. nouveau processus de fabrication des lingots ou de réalisation des soudures des adaptateurs de commande, recours à des aciers présentant des caractéristiques optimisées, investissement dans de nouvelles machines-outils, amélioration de la gestion documentaire).

1.3.7 Maintien des compétences

Enfin, pour conclure sur la prise en compte des retours d'expérience, la **perte des compétences de l'ensemble de la filière**, en l'absence de construction de réacteurs depuis Civaux (mis en service à la fin des années 1990), a entraîné la baisse de maîtrise des fabrications par la filière. Le maintien des compétences est clé pour la réussite d'EPR2 : des initiatives ont été lancées pour bénéficier de l'apprentissage de Flamanville 3 (e.g. culture de la gestion du savoir).

Afin que les compétences soient maintenues, la **visibilité à donner au plus tôt aux fournisseurs pourrait influencer sur le fait qu'ils réalisent les investissements nécessaires**. Le démarrage du programme doit également intervenir suffisamment tôt afin de ne pas recréer le contexte de Flamanville. Enfin, en lien avec les travaux sur la capacité de la filière à maîtriser un programme de construction de nouveaux réacteurs, une **cartographie des compétences et des métiers en tension** est en cours de réalisation par EDF et le GIFEN et devrait être assortie d'un plan d'actions à mettre en œuvre pour disposer des ressources nécessaires, au niveau de qualification requis et en temps voulu.

1.4 Gouvernance des choix de conception

Le design EPR2 est le fruit d'environ **10 années de retours d'expérience** sur EPR et de la **convergence des approches EDF et ex-AREVA** pour l'offre Pologne. *In fine*, les choix de conception emblématiques de l'EPR2 ont été validés dès fin 2017, grâce à une **gouvernance projet** permettant d'arbitrer les différentes options, sur la base d'études d'optimums technico-économiques, tenant compte des phases de construction et d'exploitation.

La gouvernance projet fait notamment intervenir des interlocuteurs des ingénieries EDF et Framatome ainsi que des indépendants, pilotée par un **Steering Committee**, ou Comité d'Organisation, ayant une réelle capacité de décision opérationnelle. D'un point de vue externe, si la gouvernance de la prise de décision apparaît robuste, **l'organisation et la répartition des responsabilités à travers les multiples organes de tête sont indéniablement complexes**. Cette organisation pourrait sans doute être simplifiée. Ce serait nécessaire en particulier en cas de remplacement de la direction de projet par une équipe maîtrisant moins que l'équipe actuelle les enjeux du projet dans leur intégralité et la gestion des différentes parties prenantes, afin de recréer des pratiques plus en ligne avec les besoins d'une gestion efficace (e.g. réduction de la comitologie associée au projet).

En particulier, il existe une **confusion des rôles de maîtrise d'ouvrage (MOA) et de maîtrise d'œuvre (MOE)**, historiquement hébergées au sein des mêmes entités chez EDF :

- > Rôle de MOA historiquement et successivement porté par la Direction Equipements, puis l'Ingénierie, puis la DIPNN.

- > DIPNN hébergeant par ailleurs, depuis sa création en 2015, la MOE (e.g. direction projet Flamanville 3, direction projet EPR2, etc.).

Comme le souligne le rapport J-M. Folz, il est besoin d'un *"maître d'ouvrage bien identifié et d'un maître d'œuvre, responsable de la conduite du projet, disposant d'une équipe dédiée puissante, et faisant appel aux ressources d'études et d'ingénierie selon les besoins qu'il définit"*.

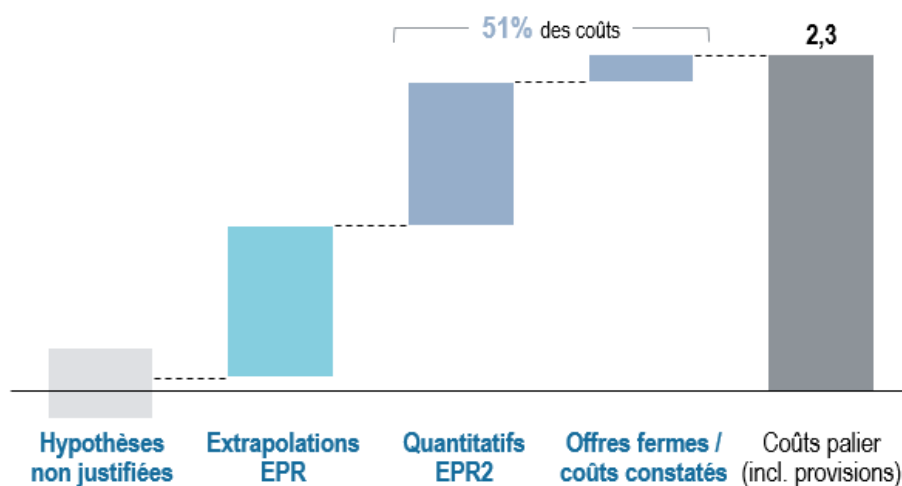
2. Audit du modèle de coût et du planning d'EDF

2.1 Modèle de coût

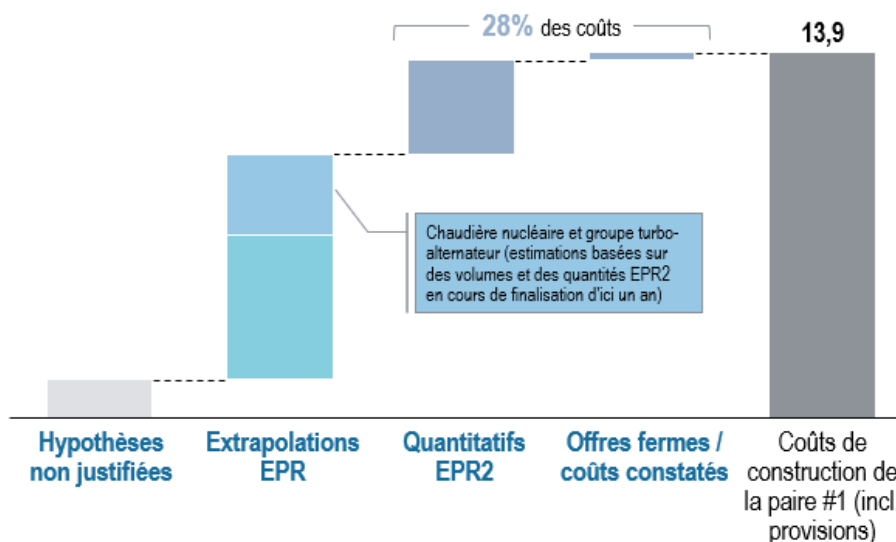
L'audit du modèle de coûts par Roland Berger a été réalisé **sur la base de l'estimation réalisée par EDF en mars 2019**. A ce stade d'avancement, le modèle de coûts présenté par EDF repose donc sur des **hypothèses de granularité différentes** (extrapolations de projets EPR, listes de volumes ou quantités de matériels, estimation forfaitaire des risques, etc.). **L'audit mené par Roland Berger vise avant tout à apprécier la robustesse de la méthodologie de chiffrage** ainsi que son degré de sécurisation, les principaux risques associés (y compris ceux liés au planning), et le reste à faire pour finaliser le modèle. Les **quantités ou volumes précis de matériel** estimés par les équipes d'ingénierie EDF en lien avec les choix d'architecture n'ont ainsi pas été challengés. En revanche, lorsque disponibles, des éléments macro de comparaison avec d'autres projets / chantiers EPR ont été apportés.

Dans l'estimation EDF de mars 2019, les **coûts palier** du programme de 3 paires de tranches EPR2 sont estimés par EDF à **2,3 Md€₂₀₁₇**, tandis que les **coûts overnight (i.e. hors financement) de la première paire de tranches** sont estimés à **13,9 Md€₂₀₁₇** :

- > Environ **50% des coûts palier** de l'estimation EDF de mars 2019 reposent sur des **quantités ou volumes de matériel EPR2** (e.g. heures d'ingénierie adossées à un plan de charge) ou à des **coûts constatés** (dépenses engagées depuis 2014).
- > Environ **30% des coûts de construction de la paire #1** de l'estimation EDF de mars 2019 reposent sur des **volumes et quantités de matériel propres à l'EPR2** (génie civil, partie du CI-BOP). Près de 60% des estimations sont encore adossées à des extrapolations du constaté sur l'EPR, ce qui n'est pas anormal à ce stade d'avancement du projet, le degré de confort de certaines estimations (chaudière nucléaire par Framatome, salle des machines) étant par ailleurs jugé élevé compte-tenu des ordres de grandeur obtenus et comparaisons disponibles.
- > Les **hypothèses jugées non suffisamment justifiées** concernent à ce stade surtout **l'estimation forfaitaire des provisions pour risques** (15% des coûts palier, 10-15% des coûts de construction des deux premières tranches), qui seront confortées par une approche probabiliste dans la prochaine version de l'estimation, et **l'intégration d'un plan d'économies de Framatome** n'ayant pas encore fait l'objet d'une déclinaison précise (description des leviers, impact, séquençement).



Décomposition des coûts palier
selon la méthodologie d'estimation EDF (Md€₂₀₁₇)



Décomposition des coûts de construction de la paire #1
selon la méthodologie d'estimation EDF (Md€₂₀₁₇)

Dans la **nouvelle estimation EDF prévue pour fin 2019**, l'estimation des coûts intégrera **davantage de remontées bottom-up** des différentes entités d'ingénierie ainsi qu'une analyse probabiliste de l'impact des risques. Enfin, **l'estimation EDF prévue pour fin 2020** intégrera des **offres engageantes de fournisseurs sur les 3 contrats principaux** (génie civil, groupe turbo-alternateur, chaudière nucléaire) représentant 35% à 40% des coûts totaux de construction.

2.2 Planning

Roland Berger a analysé le **planning de niveau 1 correspondant à l'estimation EDF de mars 2019** ainsi qu'une synthèse des **plannings de niveau 2 et 3 actuellement** en cours d'élaboration.

Le **planning de niveau 1** (< 1 000 tâches) a été établi dans le cadre de l'estimation EDF de mars 2019, et repose sur des **macro-séquences projet** (non exhaustives) intégrant le retour d'expérience EPR. Il a conduit à l'identification des principales activités critiques jusqu'à la mise en service industrielle (MSI) et des risques planning.

Le **planning de niveau 2** (environ 5 000 tâches) est en cours d'élaboration (1^{ère} version pour l'estimation EDF de décembre 2019). Consolidé à partir du planning de niveau 3, le planning de niveau 2 constituera à terme le **planning du directeur de projet, intégrant les principaux jalons fournisseurs**, permettant de décliner un planning détaillé en année N et *in fine* de piloter finement l'avancement du projet.

Enfin, le **planning de niveau 3** (environ 15 000 tâches) a été construit ex-nihilo (1^{ère} version en septembre 2019) puis affiné progressivement, les durées des tâches étant estimées et consolidées à partir de **volumes et de quantités de matériel propres à l'EPR2**, de ratios de productivité, de schémas d'organisation du travail et des ressources.

Le niveau de maturité du planning sans marge, et avant intégration des risques, est jugé élevé compte-tenu de l'avancement du projet et en comparaison des projets précédents (Flamanville 3), avec : l'intégration des retours d'expérience des projets précédents, l'existence d'un planning de niveau 3 dès les phases amont du projet, l'existence d'une analyse de risques détaillée, un processus de pilotage permettant de piloter l'activité à court terme (année N, PMT N+4) de manière fine et en lien avec le planning de niveau 2. A ce stade, comme pour les risques, la prise en compte d'opportunités dans le planning est toutefois à renforcer (existence de potentiels d'optimisation).

Au regard des **délais de construction** observés sur les **réacteurs de génération 3**, dont l'EPR, le **planning cible apparaît ambitieux**. Cette ambition est **cohérente avec les nombreux retours d'expérience pris en compte** (notamment l'amélioration de la constructibilité, les anomalies marquantes de Flamanville 3 et la professionnalisation de la conduite de projet) et **vertueuse pour fédérer EDF et ses fournisseurs** autour d'un objectif d'amélioration commune et continue pour générer de la marge planning pour l'équipe projet EPR2.

En revanche, le planning, à ce stade **déterministe**, incorpore **peu de marges pour aléas** et intègre de nombreuses **hypothèses sous-jacentes** (e.g. absence de co-activité, site non contraint, livraison à temps des équipements).

2.3 Effet de série

Dans le cadre de l'estimation de mars 2019, EDF s'est concentré sur les coûts palier et les coûts de construction *overnight* de la paire #1, et n'a donc à ce stade **pas fourni d'estimation du coût des paires #2 et #3** intégrant un effet de série. Roland Berger a donc analysé l'**effet de série** potentiel pour un programme de 3 paires de tranches EPR2, à la fois sur les **coûts** et sur le **planning de construction**.

Sur les **coûts de construction**, l'effet de série traduit la diminution du coût d'investissement moyen d'une série d'unités standardisées par rapport à celui d'une tranche isolée. En pratique, l'effet de série attendu est principalement lié à l'**amortissement des coûts palier** s'appliquant une fois pour les 6 tranches. Il est aussi lié

à **des réductions des coûts de construction entre paires successives**, permises par l'intervention de fournisseurs déjà qualifiés et montés en compétences sur un premier chantier, l'utilisation d'équipements déjà certifiés pour une utilisation sur un site nucléaire, la standardisation et la construction en série impliquant des gains achats et une meilleure efficacité de la construction. Ces réductions sont conditionnées à la **visibilité donnée à la filière industrielle** sur le programme (commande initiale de 3 paires de tranches).

Différents moyens permettent d'obtenir une estimation de l'effet de série. Un **exercice préliminaire de modélisation** a été réalisé par EDF, conduisant à un potentiel effet de série de l'ordre de **19% pour un programme de 6 tranches** (sans que cela ne signifie un engagement d'EDF à ce stade sur un montant précis). Des estimations de l'OCDE réalisées en 2000 suggèrent quant à elle un effet de série de **16% pour 3 paires**. Des **observations sur des données historiques** mettent en évidence des effets de série compris entre **6% et 19%** sur les coûts de construction pour les paliers les plus importants du parc français. Dans le cadre du programme Grand Carénage, des effets de série entre **5% et 20%** ont été observés pour des matériels.

Au regard de ces données, **Roland Berger a intégré un effet de série de 5% dans sa modélisation du programme de 3 paires de tranches EPR2** (l'effet de série étant la diminution du coût moyen du programme des 3 paires par rapport au coût de la première paire). Cela correspond à une **diminution d'environ 8% du coût des paires #2 et #3 par rapport à celui de la paire #1 (coûts hors provisions pour risques et hors contraintes sites)**.

Au-delà des économies de coûts, un apprentissage sur la **durée de construction des tranches** d'un même palier est observé par effet de série sur les données du parc. La durée de construction de la 2^{ème} tranche d'une paire sur un site est généralement plus courte que celle de la 1^{ère} tranche d'une paire avec un **gain de 6 mois entre les tranches d'une paire** (à condition qu'un délai suffisant soit respecté entre chaque début de construction). Cependant, la tranche #2 est parfois utilisée comme "tampon" pour construire la tranche #1 le plus rapidement possible, annulant le gain. En parallèle, une **diminution de la durée de construction entre 1^{ères} tranches de sites successifs** est observée (e.g. gain moyen sur 7 sites de 3 mois pour les 900 MW). En pratique, le projet EPR2 envisage de **gagner 6 mois de construction entre les 2 tranches d'une même paire**, et de **rallonger respectivement de 3 et 6 mois les durées des tranches #3 et #5** par rapport aux tranches #2 et #4, ce qui est jugé cohérent par Roland Berger au regard des données historiques du parc et de la prise en compte de l'impact du changement de site entre chaque paire.

3. Analyse des risques et opportunités

A partir de l'**analyse de risques initiée par EDF**, Roland Berger a **réévalué certains risques et opportunités** (e.g. risque de maîtrise des fabrications) et en a **ajouté ou supprimé d'autres** (e.g. opportunité de réduction des coûts sur le périmètre groupe turbo-alternateur étant donné l'ouverture à la concurrence de ce lot).

Afin de quantifier les provisions liées à l'**impact coût**, une estimation probabiliste des provisions associées à ces risques a été réalisée, via un tirage de Monte Carlo et une couverture en P50 dans le cas de base. **L'impact planning a été traduit en surcoût** en lien avec les coûts fixes d'équipe projet, d'ingénierie et de chantier avec des hypothèses de surcoûts mensuels en phase de développement et en phase de construction. Les **provisions pour risques non identifiés** estimées par EDF ont également été revues, pour intégrer (en lieu et place) un risque d'exécution inefficace des plans de prévention et de gestion des risques envisagés par EDF.

Des provisions pour risques probabilistes ont ainsi été intégrées par Roland Berger dans le modèle de coûts EDF de mars 2019 à la place des provisions forfaitaires.

L'estimation d'EDF des coûts palier et du coût *overnight* de la première paire du programme intègre également des **provisions pour incertitudes** calculées selon les standards internationaux (*Association for the Advancement of Cost Engineering*). **Roland Berger a conservé l'estimation EDF de ces provisions pour incertitudes pour chacune des trois paires**, la méthodologie utilisée étant jugée robuste. Classiquement, les projets complexes présentant un niveau de maturité similaire à celui d'EPR2 intègrent des provisions pour incertitudes de l'ordre de 5%.

Tous les **autres postes de coûts** (chaudière nucléaire, génie civil, groupe turbo-alternateur) sont restés **inchangés par rapport au modèle EDF, Roland Berger n'étant pas en mesure de challenger les volumes ou quantités de matériel estimés par l'ingénierie EDF.**

In fine, en vision Roland Berger, les coûts de l'estimation d'EDF de mars 2019 ont été réévalués à la hausse. En phase de développement, l'estimation d'EDF de mars 2019 intégrait 290 M€₂₀₁₇ de provisions forfaitaires pour risques tandis que la vision Roland Berger P50 est de 700 M€₂₀₁₇. En synthèse, les **coûts palier** sont estimés à **2,7 Md€₂₀₁₇ en vision Roland Berger P50 (2,3 Md€₂₀₁₇ en vision EDF).**

Pour la construction de la 1^{ère} paire, l'estimation EDF de mars 2019 intégrait 1 465 M€₂₀₁₇ de provisions forfaitaires pour risques tandis que la vision Roland Berger P50 est de 2 370 M€₂₀₁₇. En synthèse, les **coûts de construction overnight de la 1^{ère} paire** sont estimés à **14,8 Md€₂₀₁₇ en vision Roland Berger P50 (13,9 Md€ en vision EDF).** Cette évaluation plus élevée fait suite à l'appréciation par Roland Berger d'un risque plus important associé à la reconstruction voire au maintien des compétences de la filière. L'impact du risque lié à la maîtrise des fabrications est estimé à 510 M€ par EDF alors que Roland Berger l'estime à 1,8 Md€.

Outre les coûts, certains risques ayant potentiellement des **impacts sur le planning** restent à suivre.

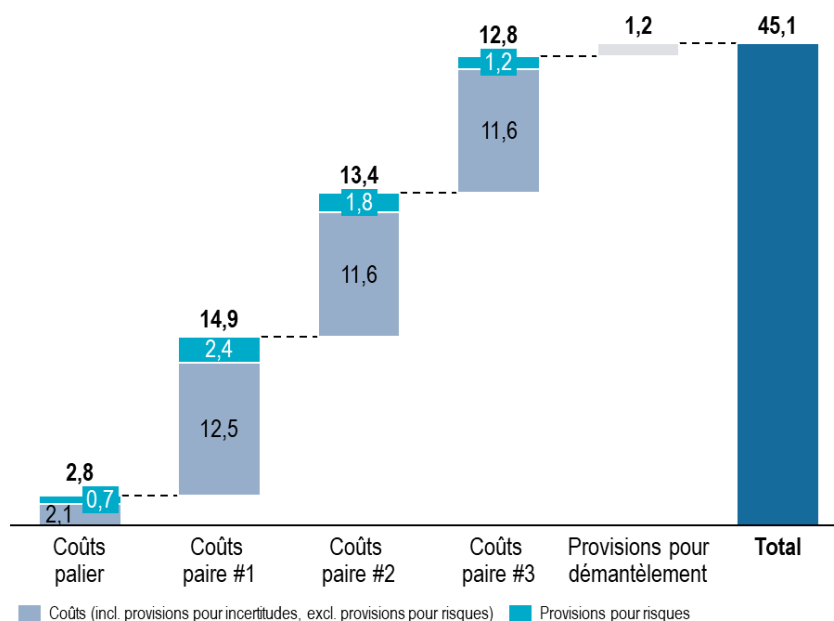
Pour ce qui concerne la **phase de développement**, le décalage de la première décision d'investissement (jalon exogène au projet, en partie lié à la mise en service de Flamanville 3) est le principal risque. La décision de choix de site est également importante pour sécuriser le planning mais aussi les étapes de *permitting*.

Pour la **phase de construction**, le manque de maîtrise des fabrications (exacerbé par un décalage éventuel de la décision d'investissement), les retards des livraisons des équipements (existence de marges négatives avec certains fournisseurs) ainsi que les délais de traitement des sujets réglementaires avec l'ASN risquent d'avoir un impact sur le planning. Roland Berger considère que la prise en compte des risques dans le **planning de construction, dans une vision P50, conduit à ajouter une marge d'environ 30% à la durée de construction estimée par EDF** dans sa vision de mars 2019. Enfin, Roland Berger a estimé qu'il existait un risque de décalage du lancement du programme EPR2 par rapport au scénario de référence d'EDF (décalage compris entre 1 et 2 ans après mi-2021), qui pourrait être de nature à renforcer les problématiques de maintien des compétences.

4. Pertinence des cibles de compétitivité

Les analyses précédemment menées sur les coûts palier et les coûts de construction *overnight* de la paire #1 ont permis d'**extrapoler les coûts de construction overnight des paires #2 et #3**. Par ailleurs, outre l'effet de série sur les coûts de construction, Roland Berger a retenu des **provisions pour risques et des contraintes sites différenciées pour chacune des trois paires**. Les provisions pour risques des paires #2 et #3 modélisées correspondent au montant de provisions pour risques de la paire #1 diminué forfaitairement de respectivement 25% et 50%. Les coûts de contraintes sites sont appréciés à partir d'estimations préliminaires d'EDF. **Le coût total du programme de 3 paires de tranches EPR2, hors intérêts intercalaires est ainsi estimé à 45,1**

Md€₂₀₁₈ en intégrant les provisions pour démantèlement, le montant hors provisions pour démantèlement étant de 43,9 Md€₂₀₁₈.



Décomposition des coûts du programme EPR2 dans la vision Roland Berger P50
(Md€₂₀₁₈, incluant 400 M€ de provisions pour démantèlement pour chacune des 3 paires)

Plusieurs prérequis importants conditionnent l'atteinte de cette estimation : une **commande simultanée d'un programme de 3 paires** (hypothèse de chiffrage d'EDF), une **construction cadencée du programme** à un rythme permettant l'intégration du retour d'expérience et un effet d'apprentissage entre tranches et paires successives, la **stabilité du référentiel réglementaire**, la **reproduction "à l'identique"** des 3 paires (hors contraintes sites) voire l'**existence de mécanismes contractuels incitatifs avec les fournisseurs** en vue d'obtenir des gains.

Etant donné le coût du programme de 3 paires de tranches EPR2 obtenu, la **vision Roland Berger** conduit à un **coût overnight** de **4 385 €₂₀₁₈/kW** (hors provisions pour démantèlement par convention, qui sont estimées par EDF à 120 €₂₀₁₈/kW).

L'objectif affiché dans l'estimation EDF de mars 2019 est de **3 650 €₂₀₁₇/kW**, soit environ **3 680 €₂₀₁₈/kW**, basé sur des coûts *overnight* pour une **paire non tête de série, excluant les coûts palier**. A titre de comparaison en vision Roland Berger, le **coût overnight** hypothétique d'une **paire de série** serait de 12,8 Md€₂₀₁₈ (en vision P50), soit **3 836 €₂₀₁₈/kW**, comparable à l'ordre de grandeur de l'objectif EDF.

Par ailleurs, la **paire standard théorique du programme EPR2 apparaît plus compétitive qu'un EPR France reconductible** (EPR de type Flamanville 3 sans aléas), estimé entre 4 810 et 5 346 €₂₀₁₈/kW), quel que soit le scénario de couverture de risques retenu.

Plus généralement, en termes de coût du kW installé, **EPR2 est ainsi compétitif par rapport au nucléaire** (notamment par rapport aux autres réacteurs de génération 3, en particulier EPR et AP 1000), d'autant plus que **le périmètre de coûts est nécessairement plus exhaustif pour EPR2** (par rapport aux données publiques disponibles à date pour les autres réacteurs), notamment concernant les coûts palier.

5. Estimation du coût complet de l'électricité

Pour l'estimation du **coût complet de l'électricité produite**, Roland Berger a mené **2 analyses distinctes**, l'une modélisant le LCOE (coût standard théorique du produit EPR2) afin de pouvoir situer la compétitivité de l'EPR2 par rapport à d'autres technologies de réacteurs nucléaires et comparer à l'objectif annoncé en 2015 par EDF de **70€₂₀₁₂/MWh**, l'autre modélisant le coût de revient du programme de 3 paires de tranches EPR2.

Dans les deux cas, les **hypothèses de modélisation** reposent sur la **vision Roland Berger des coûts et du planning** et sur un **WACC normatif réel pré-taxes de 8%** correspondant au taux utilisé historiquement par la DGEC dans les études des coûts de référence de la production électrique.

Des sensibilités ont été effectuées autour de ce 8% en utilisant 5% pour modéliser un contexte d'exposition au risque faible et 9% pour intégrer une plus grande sensibilité des investisseurs au risque.

La **modélisation du LCOE, coût standard théorique du produit EPR2**, est basée sur **les coûts de construction d'une paire post-programme de 3 paires** (hors effet éventuel d'instabilité réglementaire), **sans coûts palier et sans contraintes sites**. Les coûts sont rapportés à l'énergie théorique produite, c'est-à-dire en prenant en compte le **coefficient de disponibilité⁶ uniquement**. Dans le cadre de cette modélisation, l'estimation par Roland Berger aboutit, pour un WACC réel pré-taxes de [5% ; 8% ; 9%], à une estimation de **[51 ; 71 ; 78] €₂₀₁₈/MWh**.

La **modélisation du coût de revient du programme de 3 paires de tranches EPR2** est basée sur **les coûts palier et les coûts de construction des 3 paires, incluant les contraintes sites**. Les coûts sont rapportés à l'énergie réelle produite, c'est-à-dire en prenant en compte les **coefficients de disponibilité et d'utilisation⁷**. Dans le cadre de cette modélisation, l'estimation par Roland Berger aboutit, pour un WACC réel pré-taxes de [5% ; 8% ; 9%], à une estimation de **[63 ; 97 ; 111] €₂₀₁₈/MWh**. A cet égard, **il convient de ne pas confondre le coût de revient avec un tarif qui intégrera un WACC post-taxes et la création de valeur attendue par les investisseurs**.

D'autres **analyses de sensibilité** ont été menées sur l'estimation du coût de revient du programme de 3 paires de tranches EPR2, concluant à une forte variabilité des résultats en fonction de certains paramètres.

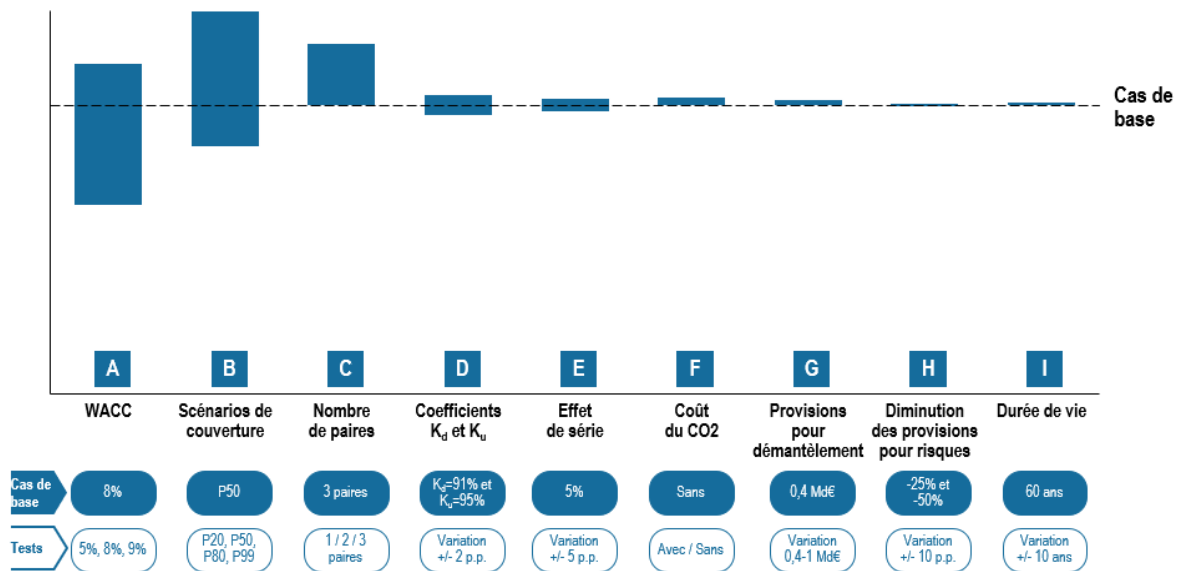
En premier ordre, outre le WACC retenu pour l'actualisation, le taux de **couverture des risques a un impact d'ordre 1 sur l'estimation. C'est également le cas du nombre de paires du programme considérées**. Sur ce point, il convient de noter que **le surcoût d'un programme qui ne porterait que sur une ou deux paires d'EPR2 serait plus élevé que celui estimé dans cet audit**, dans la mesure où les coûts de construction intègrent des gains liés à des achats groupés pour un programme de 3 paires, qu'il n'a pas été possible de complètement retraiter.

Au second ordre, une sensibilité modérée aux **coefficients de disponibilité et d'utilisation** ou à **l'effet de série** (hors amortissement des coûts palier) est constatée.

⁶ Le coefficient de disponibilité (communément appelé "Kd") s'exprime comme le rapport de l'énergie disponible, durant un intervalle de temps déterminé, au produit de la puissance nominale en régime continu, par cet intervalle de temps. Le Kd illustre l'aptitude d'un réacteur à fournir de l'énergie. Cette énergie n'est pas nécessairement appelée par le réseau électrique. Les périodes d'indisponibilité comprennent les arrêts programmés (pour entretien et/ou renouvellement de combustible), ainsi que les arrêts non programmés (incidents).

⁷ Durant sa période de disponibilité, le réacteur n'est pas forcément utilisé au maximum de sa capacité. Le coefficient d'utilisation du réacteur (communément appelé "Ku") est le ratio entre l'énergie produite et l'énergie productible. Il dépend des besoins du réseau et de la répartition des appels d'énergie entre les différentes tranches d'un même parc.

Enfin, les **provisions pour démantèlement** ou la **durée de vie** ont un **impact négligeable** sur le **coût de revient** du programme de 3 paires de tranches EPR2.



Analyse de sensibilité sur le coût de revient du programme de 3 paires de tranches EPR2